
Estudio aerodinámico de la nueva Torre de Control del aeropuerto de Tenerife-Norte

José Mesequer*, Bruce Fairbanks,
Eduardo Montero** y Santiago Pindado***

*Instituto Universitario "Ignacio Da Riva" de la Universidad Politécnica de Madrid (IDR/UPM), E.T.S.I. Aeronáuticos. <http://www.idr.upm.es/>

**GOP, Oficina de Proyectos, S.A. <http://www.gop.es>

1. INTRODUCCIÓN

Aunque el criterio fundamental de diseño de la torre de control de un aeropuerto es obviamente que esta instalación satisfaga los requisitos funcionales propios del control del tráfico aéreo (suministrar los servicios de control de tránsito aéreo a tránsito de aeródromo), el hecho de que este elemento de la arquitectura aeroportuaria deba ocupar, precisamente debido a los requisitos específicos de visibilidad, un lugar destacado dentro del complejo aeroportuario, ha ocasionado que con el tiempo estas construcciones se hayan convertido en elementos singulares y emblemáticos, diseñados tanto para cumplir la batería de requisitos operativos, constructivos y de equipamiento que aseguren el cumplimiento de su misión, como para, en muchos casos, servir de signo identificador del aeropuerto. Todo ello ha ocasionado que en los últimos años se haya vertido mucha imaginación en el diseño de tales torres de control, pudiéndose encontrar en los aeropuertos torres de control de las más variadas formas y aspectos.

El amplio plan de remodelación y ampliación de muchas de las instalaciones aeroportuarias es-

pañolas acometido por Aena, ha brindado una oportunidad única para singularizar tanto los edificios terminales como las torres de control de muchos aeropuertos nacionales, confiriendo un carácter propio y diferenciado a las nuevas instalaciones, que en poco o nada se asemejan a las anteriores, con formas exteriores clásicas y en cierto sentido anodinas, arquitectónicamente hablando. En el caso de las torres de control más recientes se pueden destacar, por ejemplo, la de Bilbao-Sondica (de Fernández y Calatrava), la de Tenerife-Sur (de García Cruzado, Torres y Partearroyo) o la de Madrid-Barajas y la de Málaga (ambas de Montero y Fairbanks).

En el caso de las torres de control de Juan Montero y Bruce Fairbanks se puede destacar que, gracias a la política de fomento de las actividades de investigación, desarrollo e innovación promovida por la empresa responsable de estos proyectos (GOP S.A.), sin duda alentada por el papel de puente entre los mundos empresarial y académico jugado por el malogrado profesor Juan Montero (fallecido en 1999), hace ya cuatro años que se iniciaron los contactos entre esta empresa e IDR/UPM, centrados al principio en las necesidades puntuales de GOP S.A. de ensayos en túnel ae-

rodinámico para dilucidar el estado de cargas de viento sobre edificaciones singulares (entre las que se cuentan las mencionadas torres de control de Madrid-Barajas y Málaga), contactos que posteriormente han dado lugar al establecimiento de un marco permanente de cooperación entre ambas entidades, GOP S.A. e IDR/UPM, en el que se pueden contabilizar ya bastantes iniciativas conjuntas en el ámbito de la ingeniería aeroportuaria, siendo de destacar, citando los ejemplos al caso exclusivo de las torres de control, los proyectos de la torre de control del aeropuerto de La Rioja, éste de la torre del aeropuerto de Tenerife-Norte, y el de la futura torre del aeropuerto de Barcelona.

Para determinar el estado de cargas aerodinámicas sobre el complejo formado por el edificio base y la torre de control del aeropuerto de Tenerife-Norte, se ha construido y ensayado en el túnel aerodinámico A9 del instituto IDR/UPM (Sanz *et al.* 2000), un modelo del citado complejo, debidamente instrumentado con tomas de presión (figura 1). El objetivo de este análisis experimental es por una parte determinar las cargas máximas de succión que actúan sobre las superficies exteriores tanto del fuste y el fanal como de la cubierta del edificio base, y a partir de esta información, determinar el estado de cargas globales sobre la torre de control y sobre la mencionada cubierta.

2. REQUISITOS DE DISEÑO AERODINÁMICO

Los elementos tradicionales de una torre de control son el fanal, donde trabajan los controladores, responsables de la ordenación y el control de los movimientos de las aeronaves, la zona de equipos, el área técnica y el área de servicios y descanso. Una torre suele tener un edificio base, normalmente de poca altura, sobre el que se levanta el fuste de la torre, que sostiene la plataforma elevada donde se ubican equipos y áreas de servicio y, como remate superior, el fanal acristalado, sobre el que descansa el campo de antenas.

En el caso de la nueva torre de control del aeropuerto de Tenerife-Norte, sobre el edificio base, de planta aproximadamente rectangular, con una longitud del orden de 65 m y en torno a 13 m de ancho, se extiende una cubierta de planta casi trape-

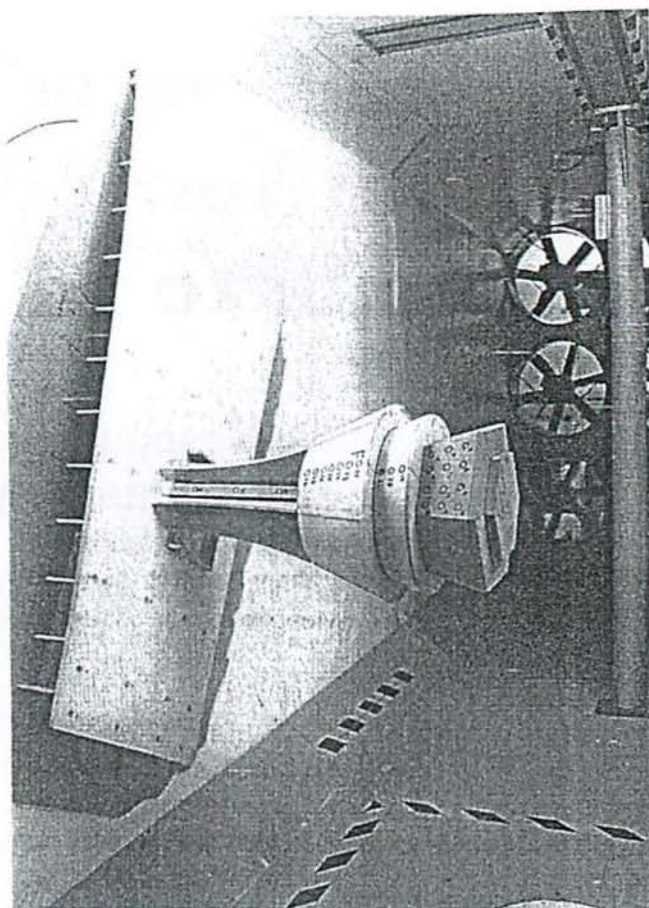


FIGURA 1.

Modelo de ensayos del complejo formado por la torre de control y su edificio base del aeropuerto de Tenerife-Norte en el interior de la cámara de ensayos del túnel A9 de IDR/UPM. En la imagen se pueden apreciar las tomas de presión repartidas por las superficies de interés.

zoidal, que recubre tanto el edificio base como el aparcamiento habilitado en el lado tierra de la edificación. Esta cubierta, que se asemeja al ala de una aeronave, tiene una superficie en planta de algo más de 1500 m², y sobre la misma se levanta el fuste de la torre, una columna de sección circular de la que sobresalen seis cartelas equiespaciadas que conforman un hexágono virtual cuyo lado crece con la altura. El fuste, cuya altura es de casi 25 m (tomando como origen el nivel de la entrada a la construcción por el lado tierra), acaba en la entreplanta de aire acondicionado. Sobre ésta está la entreplanta operativa, con la sala de descanso y aseos, y sobre la entreplanta operativa descansa a su vez la entreplanta técnica/operativa, cuyo techo sirve de base para el fanal de planta hexagonal. La torre queda rematada por el campo de antenas,

cuya terraza se alza a más de 40 m sobre el nivel de referencia anteriormente especificado.

Hay que señalar que en este diseño se han aplicado los criterios de diseño aerodinámico ya usados con éxito en realizaciones anteriores de la misma empresa (en la torre de control del aeropuerto de Madrid-Barajas y en la del aeropuerto de Málaga). Así, con el fin de minimizar los posibles efectos dinámicos asociados a la formación de una calle de torbellinos alternados corriente abajo del fuste, éste ha sido diseñado con aristas vivas, incorporando también paredes porosas en las entreplantas técnicas para dificultar en lo posible la formación de estructuras turbillonarias coherentes en la estela de la torre (calle de torbellinos de Kármán) que den lugar a la aparición de cargas alternadas sobre la torre (Meseguer *et al.* 2000, Meseguer *et al.* 2001).

3. MODELO Y PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

Para determinar las cargas aerodinámicas tanto sobre la torre como sobre la cubierta del edificio base se ha construido a escala 1/60 un modelo de la edificación, en el que se han reproducido todos los detalles de la misma que son aerodinámicamente significativos (figura 1). Este modelo de ensayos está instrumentado con ochenta y seis tomas de presión, de las cuales treinta y una están en la torre y el resto, cincuenta y cinco, sobre la cubierta. En la torre, a la hora de colocar las tomas de presión se ha tenido en cuenta la regularidad geométrica de las diversas plantas (circulares o hexagonales), lo que permite, en virtud de las simetrías existentes, determinar las cargas aerodinámicas sobre toda la torre instrumentando tan solo una generatriz de las plantas circulares y una cara de las plantas hexagonales, modificando posteriormente durante los ensayos la orientación de la torre respecto a la corriente incidente. De este modo, las tomas de presión sobre la torre están concentradas en la generatriz encarada al lado tierra en las plantas de sección circular (tres en la entreplanta técnica/operativa y siete en el conjunto de entreplantas de aire acondicionado y operativa, véase la figura 2); también hay tres tomas en el fuste, en el segmento de arco comprendido entre cartelas orienta-

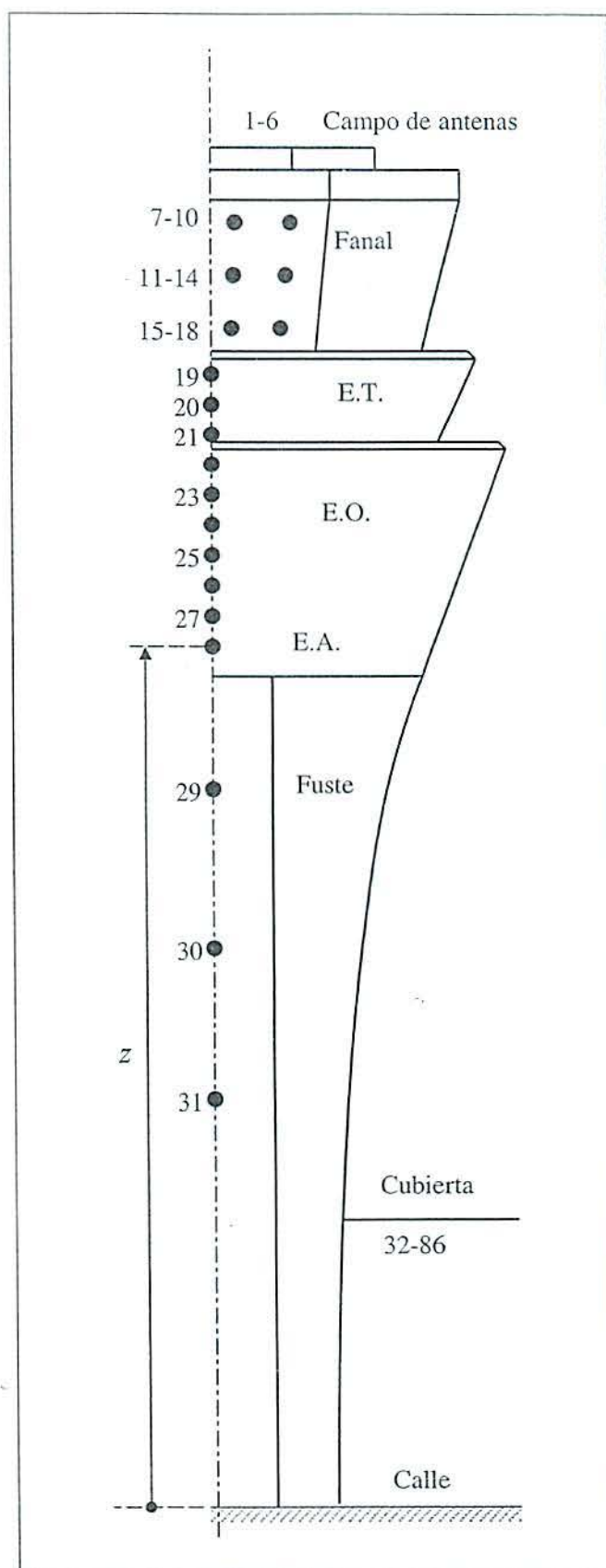


FIGURA 2.

Esquema del modelo de ensayos de la torre de control, con la posición y numeración de las tomas de presión situadas en la torre.

do hacia el lado tierra, doce tomas en el fanal (igualmente en la cara orientada hacia el lado tierra, estando distribuidas estas doce tomas en tres filas y cuatro columnas), y además, por último, se han dispuesto seis tomas de presión en la terraza del campo de antenas. Hay que señalar que en el modelo de ensayos el revestimiento de la entreplantas técnicas es sólido, impermeable al viento, pues este tipo de revestimiento es conservador desde el punto de vista de las cargas aerodinámicas (la carga de viento es generalmente mayor sobre una superficie sólida que sobre una superficie porosa, permeable al viento).

Las tomas de presión sobre la cubierta del edificio base y aparcamiento están distribuidas de forma casi regular sobre la forma en planta (figura 3), si bien la concentración de tomas es mayor cerca de aleros y esquinas, donde, como es sabido, se producen las cargas de succión más severas, originadas por los torbellinos cónicos que barren la cubierta para ciertos ángulos de incidencia de la corriente. Hay que señalar que en el modelo de la cubierta se ha supuesto que el hueco existente en la estructura real sobre el aparcamiento está cerrado (aunque la posibilidad de que este hueco exista realmente en la cubierta ha sido tenido en cuenta a la hora de interpretar los resultados medidos).

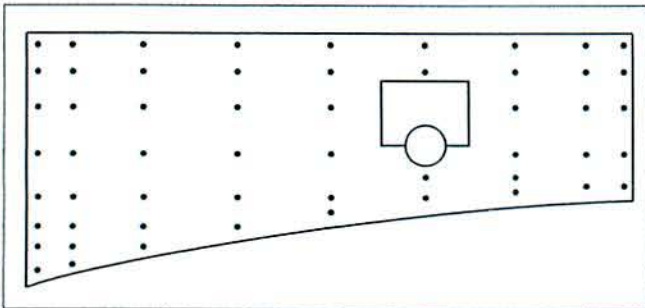


FIGURA 3.

Esquema de la planta de la cubierta del edificio base y situación de las tomas de presión ubicadas en la cubierta del modelo de ensayos.

Para la medida de las presiones sobre el modelo de ensayos, éste se coloca sobre una de las plataformas giratorias existentes en las paredes laterales del Túnel A9 de IDR/UPM. Las tomas de presión se conectan a dos lectores secuenciales de presión Scanivalve modelo 48J7-1, que tienen, cada uno, cuarenta y ocho entradas más una toma de referen-

cia. La posición de lectura de cada Scanivalve se controla mediante un actuador Scanivalve modelo JS4-48, que va conectando secuencialmente cada una de las entradas con uno de los lados del sensor de presión diferencial instalado en su interior. La posición de lectura en la que se encuentran en cada instante los lectores secuenciales se determina con decodificadores Scanivalve modelo JOPOETM-48. Al mismo tiempo las presiones estática y dinámica en la cámara de ensayos del túnel se mide con un tubo de Pitot Airflow modelo 3.3.311 colocado corriente arriba, lejos del modelo de ensayos.

Todas las señales diferenciales de presión se miden con cápsulas Druck modelo PDCR 22, unas instaladas en el interior de los lectores secuenciales y otra conectada a la señal de presión dinámica. La señales eléctricas generadas en estas cápsulas de presión pasan a sendos acondicionadores de señal, Druck modelo DPI 260, que además proporcionan una indicación numérica visual del valor de la presión que se está midiendo. Las señales eléctricas analógicas, una vez filtradas, son medidas por un sistema de adquisición de datos IOTech modelo ADC 488, conectado a un bus IEEE 488 controlado por un ordenador. Este equipo de adquisición de datos posee también entradas y salidas digitales que permiten controlar y comprobar, a través de la correspondiente interfase, la posición de lectura de los lectores secuenciales.

Para obtener las distribuciones de coeficiente de presión, $c_p(n, \alpha)$, las distribuciones de presión medidas se adimensionalizan en la forma habitual:

$$c_p(n, \alpha) = \frac{p(n, \alpha) - p_\infty}{q_\infty}, \quad (1)$$

donde $p(n, \alpha)$ es la presión medida en la toma n cuando el ángulo de incidencia de la corriente es α , y p_∞ y q_∞ las presiones estática y dinámica de la corriente incidente, medidas ambas con el tubo Pitot de referencia ($q_\infty = \frac{1}{2} \rho U^2$, siendo ρ la densidad del aire y U su velocidad corriente arriba, lejos del obstáculo).

4. RESULTADOS

Las distribuciones de coeficiente de presión sobre el modelo de ensayos, $c_p(n, \alpha)$, han sido medidas para veintiuna orientaciones distintas del mo-

delo respecto a la corriente incidente, habiéndose variado el ángulo de incidencia de la corriente, α , de 15° en 15° entre $\alpha = 0^\circ$ y $\alpha = 180^\circ$ (el origen de ángulos ha sido fijado, arbitrariamente, en la posición en la que la corriente incide perpendicularmente a la fachada del lado aire del edificio base), y de 30° en 30° entre $\alpha = 180^\circ$ y $\alpha = 330^\circ$. Además se han llevado a cabo ensayos adicionales en el entorno de $\alpha = 45^\circ$ (concretamente para $\alpha = 40^\circ$, $\alpha = 50^\circ$ y $\alpha = 55^\circ$) con el propósito de confirmar y analizar con más detalle el altísimo pico de succión que aparece sobre la cubierta del edificio base en este intervalo de ángulos de incidencia.

Con este esquema de ensayos, y teniendo en cuenta las simetrías existentes en la geometría de la torre, se conoce la distribución azimutal de coeficiente de presión sobre las partes de la torre de planta circular, en intervalos de 15° , y la distribución de presiones sobre todas las caras del fanal para tres ángulos de incidencia (corriente incidente perpendicular a una cara de referencia, y corriente incidente formando un ángulo de 15° , o de 30° , con la dirección anterior), que resumen sobradamente los distintos casos de carga de viento sobre el fanal.

Respecto al edificio base, en el que no existen simetrías, cada ángulo de incidencia proporciona un estado de cargas de viento distinto, siendo la envolvente de los casos medidos (las succiones máximas en cada toma cualquiera que sea el ángulo de incidencia a la que se produce) la condición que define el estado de cargas de diseño.

La determinación de las cargas eólicas sobre la torre a partir de las distribuciones de coeficiente de presión medidas a distintos ángulos de incidencia descansa en la hipótesis de que la interferencia aerodinámica entre la torre y el edificio base es independiente del ángulo de incidencia de la corriente. Si el edificio base no existiera, o si presentara alguna simetría de revolución, esta afirmación (ausencia de interferencia aerodinámica o independencia del ángulo de incidencia) sería rigurosamente cierta, pero como el edificio base no posee estas cualidades geométricas, se podría esperar una cierta dependencia de los resultados medidos sobre la torre con el ángulo de incidencia, aunque solamente en las tomas de presión del fuste próximas a la cubierta. Hay que decir que los resultados medidos sobre la torre no muestran esta dependencia, lo que sin

duda es debido al diseño del fuste, con marcadas aristas vivas.

Con relación a las distribuciones de coeficiente de presión sobre las distintas caras del fanal, la carga de succión más perjudicial aparece cuando la corriente forma un ángulo de 15° con la dirección de referencia, en cuyo caso el coeficiente de presión en el exterior del fanal alcanza el valor $c_p = -2,1$.

Con los valores medidos del coeficiente de presión se puede calcular el coeficiente de presión medio que actúa sobre cada una de las líneas horizontales de tomas en las distintas caras del fanal, y con estos valores medios, proyectando la fuerza por unidad de longitud según la vertical que actúa sobre cada cara en la cota en consideración se obtienen los coeficientes de fuerza en ejes cuerpo, $c_{fx}(z)$ y $c_{fy}(z)$ respectivamente (adimensionalizados con la anchura máxima del fanal en la cota considerada). A partir de estos valores de $c_{fx}(z)$ y $c_{fy}(z)$ el coeficiente de fuerza global que actúa en la sección en consideración resulta ser:

$$c_F(z) = \sqrt{c_{fx}^2(z) + c_{fy}^2(z)}. \quad (2)$$

Respecto a las cargas aerodinámicas sobre las entreplantas técnica y operativa, y sobre el fuste, a partir de la distribución de presión azimutal en cada toma, $c_p(z, \theta)$, se calcula el coeficiente de fuerza mediante la expresión:

$$c_F(z) = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} c_p(z, \theta) \cos \theta d\theta; \quad (3)$$

nótese que, de acuerdo con la expresión (3), los coeficientes $c_F(z)$ están cada uno adimensionalizados con el diámetro de la sección circular correspondiente a la planta situada a la altura z (o de la circunferencia donde se inscribe la sección en el caso del fuste).

Se debe señalar que en el caso del fuste se ha supuesto que los coeficientes de presión (medidos únicamente en la parte circular del mismo) son aplicables también en las cartelas que conforman la planta hexagonal.

Los resultados globales, la variación con la altura de los coeficientes de fuerza global, $c_F(z)$, en las distintas secciones de la torre, se muestran en la tabla 1; en esta tabla se muestran también los coe-

TABLA 1.

Variación con la altura, z , del coeficiente de fuerza global, c_F , y del coeficiente de fuerza medio en cada tramo, c_{Fm} .

Planta	Toma	z [m]	c_F	c_{Fm}
Campo de antenas	1-6	40,46		
Fanal	7-10	38,14	1,14	1,13
	11-14	36,65	1,20	
	15-18	35,16	1,04	
Entreplanta técnica (E.T.)	19	33,43	1,15	1,03
	20	32,24	1,02	
	21	31,05	0,95	
Entreplanta operativa (E.O.)	22	30,39	0,99	0,97
	23	29,50	0,97	
	24	28,60	0,96	
	25	27,71	0,95	
	26	26,81	0,92	
	27	25,92	0,94	
	28	25,03	1,03	
Aire acondicionado (E.A.)	29	20,50	1,26	1,31
	30	16,03	1,31	
	31	11,56	1,37	
Fuste				
Planta baja	Calle	0,00		

ficientes medios de fuerza en cada parte de la torre, c_{Fm} , empleados para el cálculo de las distribuciones de fuerza cortante y de momento flector a lo alto de la torre de control.

Respecto a las cargas sobre la cubierta del edificio base, la envolvente más desfavorable del estado de cargas aerodinámicas queda definido por los valores extremos de las cargas de succión registrados en cada toma, cualquiera que sea el ángulo de incidencia de la corriente para el que se presenta este valor extremo. Las cargas de succión sobre la cubierta son extremadamente elevadas en las líneas de tomas próximas a los aleros laterales, sobre todo en el lateral más largo y más alejado de la torre, donde se alcanza, para $\alpha = 50^\circ$ el valor $c_p = -4,1$. Obviamente este fenómeno también aparece, aunque algo menos acusado, en el lado opuesto de la cubierta (en el lateral más corto), donde para el ángulo de incidencia $\alpha = 240^\circ$ se alcanza el valor $c_p = -2,4$.

En la figura 4 se muestra la variación del coeficiente de presión, c_p , a lo largo de la línea de tomas crítica para distintos valores del ángulo de inciden-

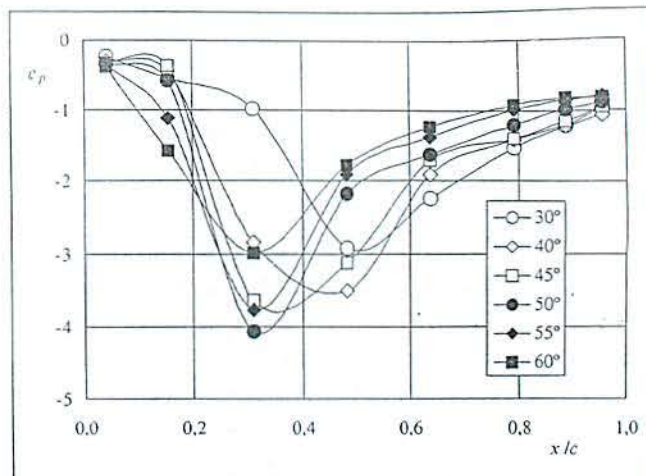


FIGURA 4.

Variación del coeficiente de presión, c_p , a lo largo de la línea de tomas crítica de la cubierta del edificio base para distintos valores del ángulo de incidencia de la corriente, α .

cia de la corriente, y en la figura 5 la variación con este ángulo de la carga de succión extrema, c_{pm} , sobre la cubierta. De los datos de la figura 4 se deduce que el pico de succión es tanto más localizado cuanto más acusado, lo cual está relacionado tanto con la intensidad del torbellino cónico que se forma en este alero de la cubierta para los ángulos de incidencia en consideración, como con la extensión del citado torbellino.

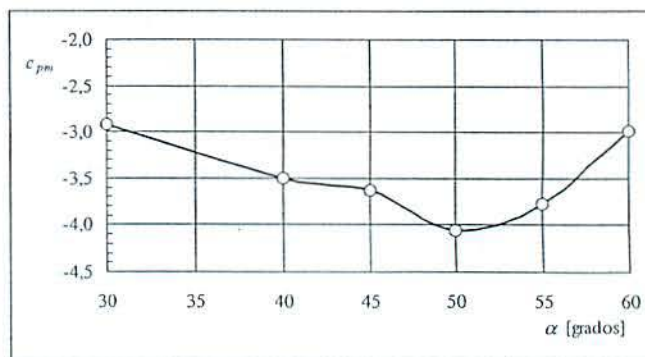


FIGURA 5.

Variación con el ángulo de incidencia de la corriente, α , del coeficiente de presión más extremo, c_{pm} , en la cubierta del edificio base.

4.1. Cargas aerodinámicas sobre la torre

El estado de cargas aerodinámicas sobre la torre de control del aeropuerto de Tenerife-Norte

está determinado por una parte por las cargas que actúan sobre los revestimientos, dadas por la diferencia entre las presiones en el exterior y en el interior de los distintos habitáculos, y por las cargas aerodinámicas que actúan sobre la estructura de la torre de control (distribuciones verticales de fuerza cortante y de momento flector), cuyo valor depende en cada sección de la integral de la proyección de las presiones exteriores en la dirección requerida, y que en forma adimensional es el coeficiente de fuerza $c_{Fm}(z)$ detallado en la tabla 1.

TABLA 2.

Diferencia entre los coeficientes de presión en el interior, $c_{p\text{ int}}$, y el coeficiente de presión crítico en el exterior, $c_{p\text{ ext}}$, en las distintas partes de la torre.

Zona	$c_{p\text{ int}}$	$c_{p\text{ ext}}$	$c_{p\text{ int}} - c_{p\text{ ext}}$
Campo de antenas	0,8	-1,8	2,6
Fanal	0,8	-2,1	2,9
Entreplanta técnica (E.T.)	0,8	-1,9	2,7
Entreplanta operativa (E.O.)	0,8	-1,1	1,9
Aire acondicionado (E.A.)	0,8	-1,1	1,9
Fuste	0,8	-0,9	1,7

Respecto a las cargas sobre los revestimientos, el caso más dañino se presenta cuando en el exterior existe una carga de succión y en el interior el flujo está remansado, con lo que la carga resultante es la suma de los valores absolutos de las dos anteriores, tendiendo a separar el revestimiento de la fachada. Esta carga sobre los revestimientos, por unidad de superficie, P , viene dada por la expresión $P = q_{\infty} (c_{p\text{ int}} - c_{p\text{ ext}})$, donde q_{∞} es la presión dinámica de diseño de la corriente incidente ($q_{\infty} = \frac{1}{2} \rho U^2$), $c_{p\text{ int}}$ el coeficiente de presión en el interior (de acuerdo con la recomendación del Eurocódigo 1 se puede tomar $c_{p\text{ int}} = 0,8$ (Eurocódigo 1, 1998)) y $c_{p\text{ ext}}$ el coeficiente de presión en el exterior, cuyo valor de cálculo (mínimo) en las distintas zonas de la torre se muestra en la tabla 2.

En lo que se refiere a las distribuciones de fuerza cortante y momento flector, la fuerza cortante que actúa sobre un elemento de torre (de altura

unidad) situado en la cota z (medida respecto a la planta baja) es $f(z) = q_{\infty} c_{Fm}(z) l(z)$, donde q_{∞} es, al igual que antes, la presión dinámica, $c_{Fm}(z)$ el coeficiente de fuerza medio en cada parte (dado en la tabla 1), y $l(z)$ la longitud característica a la altura considerada (el diámetro de la circunferencia circunscrita).

Conocida la fuerza cortante por unidad de altura que actúa sobre las distintas plantas de la torre, la distribución vertical de fuerza cortante, es decir, la resultante de las fuerzas que actúan entre la cota en consideración, z , y la cota máxima de la torre de control, z_{max} , será:

$$F(z) = \int_z^{z_{\text{max}}} f(\zeta) d\zeta = q_{\infty} \int_z^{z_{\text{max}}} c_{Fm}(\zeta) l(\zeta) d\zeta. \quad (4)$$

donde z_{max} es la cota de la terraza del campo de antenas ($z_{\text{max}} = 40,7$ m). De forma análoga, la distribución vertical de momento flector es:

$$M(z) = \int_z^{z_{\text{max}}} f(\zeta) (\zeta - z) d\zeta = \int_z^{z_{\text{max}}} f(\zeta) \zeta d\zeta - z \int_z^{z_{\text{max}}} f(\zeta) d\zeta = \int_z^{z_{\text{max}}} f(\zeta) \zeta d\zeta - zF(z). \quad (5)$$

Las distribuciones verticales de fuerza cortante y momento flector, obtenidas con las expresiones (4) y (5) respectivamente, normalizadas con los valores máximos de estas cargas, $F(z)/F_{\text{max}}$ y $M(z)/M_{\text{max}}$, han sido ajustadas por mínimos cuadrados a expresiones polinómicas sencillas, siendo las expresiones resultantes, en función de la variable $\eta = (z_{\text{max}} - z)/z_{\text{max}}$:

$$M(z)/M_{\text{max}} = -0,7177\eta^4 + 1,0116\eta^3 + 0,7494\eta^2 - 0,0450\eta + 0,0017, \quad 0 \leq \eta \leq 1 \quad (6)$$

$$F(z)/F_{\text{max}} = -0,4278\eta^3 - 0,0354\eta^2 + 1,7325\eta - 0,1340, \quad 0 \leq \eta \leq 0,78 \quad (7a)$$

$$F(z)/F_{\text{max}} = 1, \quad 0,78 \leq \eta \leq 1 \quad (7b)$$

con $M_{\text{max}}/q_{\infty} = 10920$ m³, y $F_{\text{max}}/q_{\infty} = 418$ m².

4.2. Cargas aerodinámicas sobre la cubierta del edificio base

El elemento crítico del edificio base es la cubierta, donde, como se ha dicho en el apartado 4, aparecen cargas de succión muy severas en torno a $\alpha = 45^\circ$. Del análisis de las cargas extremas resulta patente la existencia de zonas de succión potencialmente peligrosas para la integridad de la cubierta en el alero de la fachada del lado aire y en los de las fachadas laterales, siendo las cargas extremas particularmente elevadas en la fachada lateral más larga.

Ciertamente, en el modelo de ensayos no se ha reproducido el hueco existente en la cubierta sobre la zona de aparcamientos. Se ha supuesto que esta parte de la cubierta es impermeable al viento, simulando una posible configuración futura, más crítica que la actual desde el punto de vista aerodinámico, en la que el hueco en cuestión estuviera cerrado. Hay que decir que la existencia de este área de paso del aire en la cubierta no modifica el estado de cargas en los aleros, pues para los ángulos de incidencia de la corriente para los que se presentan las cargas mayores en los aleros estos quedan a barlovento del hueco, de modo que su existencia influye poco o nada en las cargas aerodinámicas sobre los bordes de la cubierta.

Para simplificar el procedimiento del cálculo de las cargas aerodinámicas sobre la cubierta, conviene dividir ésta en zonas en las que se supone que el coeficiente de presión (carga de succión) es constante, asignándole un valor promediado de los valores extremos registrados en las tomas incluidas en la zona en consideración. Con este criterio se ha dividido la planta de la cubierta del edificio base en cinco zonas, como se muestra en la figura 6, indicándose en la tabla 3 los valores de los coeficientes aerodinámicos a emplear en cada zona. En este caso la sustentación (la carga por unidad de superficie, positiva cuando tiende a levantar la cubierta), se define como $L = q_\infty c_L$, donde q_∞ es la presión dinámica de diseño de la corriente incidente ($q_\infty = \frac{1}{2} \rho U^2$), y c_L el coeficiente de sustentación $c_L = c_{p\text{ in}} - c_{p\text{ ex}}$, siendo $c_{p\text{ ex}}$ el coeficiente de presión en el extradós (la parte superior) de la cubierta y $c_{p\text{ in}}$ el coeficiente de presión en el intradós (la parte inferior de la cubierta); también aquí, de acuerdo con la recomendación del Eurocódigo 1 se ha to-

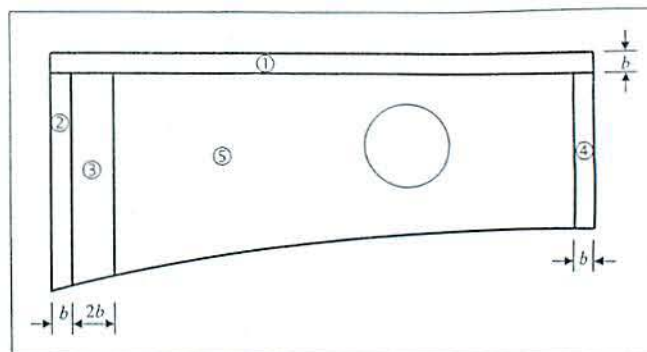


FIGURA 6.

Zonas de la cubierta del edificio base donde se supone que las cargas aerodinámicas son constantes; la longitud de referencia b es 1/26 veces la longitud de la cubierta ($b \approx 2,7$ m).

TABLA 3.

Coeficientes de presión medios en el intradós, $c_{p\text{ in}}$, en el extradós, $c_{p\text{ ex}}$, y coeficiente de sustentación medio, c_L , en las distintas zonas de cálculo de la cubierta del edificio base.

Zona	$c_{p\text{ in}}$	$c_{p\text{ ex}}$	$c_L = c_{p\text{ in}} - c_{p\text{ ex}}$
1	0,8	-2,0	2,8
2	0,8	-3,5	4,3
3	0,8	-1,8	2,6
4	0,8	-2,2	3,0
5	0,8	-1,2	2,0

mado $c_{p\text{ in}} = 0,8$, valor muy conservador para las zonas de aleros y aparcamiento, donde la corriente raramente llegará a estar remansada en una extensión amplia de la cubierta.

5. REFERENCIAS

- EUROCÓDIGO 1, 1998: *Bases de proyecto y acciones en estructuras. Parte 2-4: Acciones en estructuras. Acciones del viento. UNE-ENV 1991-2-4*, AENOR, Madrid.
- MESEGUER, J., SANZ, A., PERALES, J. M. & PINDADO, S., 2000: *Aerodinámica de instalaciones aeroportuarias*, Fundación Aena, Madrid.
- MESEGUER, J., SANZ, A., PERALES, J. M. & PINDADO, S., 2001: *Aerodinámica civil. Cargas de viento en las edificaciones*, McGraw-Hill Interamericana de España, S.A.U., Madrid.
- SANZ, A., PERALES, J. M., MESEGUER, J., LAVERÓN, A. & BEZ-DENEJNYKH, N., 2000: Las instalaciones de aerodinámica experimental de la E.T.S.I. Aeronáuticos. Parte II: 1994-, *Ingeniería Aeronáutica y Astronáutica*, número 360, págs. 1-8.